

Анализ возможностей использования сигналов подсвета 5G в полуактивной радиолокационной системе

В. М. Кутузов¹, В. И. Веремьев², Нгуен Ван Туан^{3✉}, Е. Н. Воробьев²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

³ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

✉ hinhthien08@gmail.com

Аннотация

Введение. В полуактивных радиолокационных системах (ПАРЛС) обнаружение целей выполняется по отраженным сигналам, излученным сторонними передатчиками. Отсутствие собственного передатчика определяет основные преимущества ПАРЛС в сравнении с активными РЛС: более низкая стоимость, скрытность работы, отсутствие электромагнитного воздействия на другие радиотехнические устройства и окружающую среду. В зависимости от доступности и зоны действия передатчиков, характеристик используемых сигналов, а также областей возможного применения ПАРЛС в качестве источников подсвета сегодня используют передатчики различных телекоммуникационных систем, включая теле- и радиовещание, навигационные и системы мобильной связи. Появление новых стандартов телекоммуникационных систем открывает дополнительные перспективы для развития ПАРЛС. Так, внедрение пятого поколения мобильной связи стандарта 5G с более высокой пропускной способностью потенциально может повысить точностные характеристики обнаружения целей в ПАРЛС, работающей по сигналам передатчиков нового стандарта. Исследование возможностей использования сигналов передатчиков стандарта 5G в качестве радиолокационного подсвета является актуальной задачей.

Цель работы. Анализ возможностей, ограничений и перспектив использования сигналов 5G в качестве подсвета в полуактивных радиолокационных системах.

Материалы и методы. В проведенных исследованиях использовались основы теории полуактивной радиолокации, теории связи, сравнительный анализ. Оценка потенциальных характеристик обнаружения целей проведена с помощью компьютерного статистического моделирования в среде MATLAB.

Результаты. Исследованы особенности сигналов стандарта 5G с точки зрения их применения в качестве сигналов подсвета в ПАРЛС. Проведена оценка потенциальных характеристик обнаружения целей в ПАРЛС, использующей сигналы 5G в качестве радиолокационного подсвета, и их сравнение с характеристиками ПАРЛС, работающей по сигналам других передатчиков. Показано, что сигнал 5G позволяет получить лучшее разрешение по дальности и скорости, чем сигналы других телекоммуникационных систем.

Заключение. В результате сравнительного анализа показано, что передатчики сигналов 5G NR можно использовать в качестве перспективного источника подсвета в полуактивных радиолокационных системах на относительно небольших территориях.

Ключевые слова: полуактивная радиолокация, пассивный когерентный радиолокатор, сеть 5G, источник подсвета

Для цитирования: Анализ возможностей использования сигналов подсвета 5G в полуактивной радиолокационной системе / В. М. Кутузов, В. И. Веремьев, Нгуен Ван Туан, Е. Н. Воробьев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 67–78. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-67-78

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; принята к публикации после рецензирования 12.01.2024; опубликована онлайн 29.02.2024



Feasibility Study of Using 5G Signals for Illumination Purposes in Passive Radar

Vladimir M. Kutuzov¹, Vladimir I. Veremyev², Nguyen Van Tuan³, Evgenii N. Vorobev²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

³ Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

✉ hinhthien08@gmail.com

Abstract

Introduction. Passive radars perform target detection based on reflected signals emitted by third-party transmitters. The absence of its own transmitter determines the main advantages of passive radars compared to conventional active radars: lower cost, silent operation, no electromagnetic impact on other radio equipment and the environment. Third-party transmitters of different telecommunication systems are currently used as illuminators of opportunity in passive radars. The emergence of new telecommunication standards opens additional prospects for the development of passive radars. For instance, the deployment of the fifth generation of mobile communications standard 5G with a higher bandwidth can potentially improve the accuracy of target detection in passive radars. Investigating the possibility of using signals from 5G transmitters for radar targets illumination is a relevant research task.

Aim. To analyze the possibilities, limitations and prospects of using 5G signals as illuminators of opportunity in passive radar systems.

Materials and methods. The methods of passive radar theory, communication theory, and comparative analysis were used. Evaluation of potential characteristics of target detection was carried out using computer statistical modelling in the MATLAB environment.

Results. The peculiarities of 5G signals from the point of view of their application as illumination signals in passive radars are investigated. The potential target detection characteristics of a passive radar using 5G signals for target illumination are evaluated and compared with those of passive radars operating on signals from other transmitters. The 5G signal provides an improved range and velocity resolution than signals from other telecommunication systems.

Conclusion. The comparative analysis shows that 5G NR signal transmitters can be used as a promising source of illumination in passive radar systems over relatively small areas.

Keywords: passive radar, passive coherent radar, 5G network, illumination signal

For citation: Kutuzov V. M., Veremyev V. I., Nguyen Van Tuan, Vorobev E. N. Feasibility Study of Using 5G Signals for Illumination Purposes in Passive Radar. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 67–78. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-67-78

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 13.11.2023; accepted 12.01.2024; published online 29.02.2024

Введение. Полуактивная радиолокация является одним из видов радиолокации, при которой в качестве зондирующего сигнала используется сигнал стороннего источника, т. е. отсутствует собственный передатчик, и регистрируется сигнал, отраженный от объекта наблюдения [1]. Сигналы стороннего передатчика называются сигналами подсвета. Данный вид радиолокации отличается от активной радиолокации, где присутствует излучение собственного зондирующего сигнала, и от пассивной радиолокации, которая основана на приеме собственного излучения объекта. История радиолокации начинается с экспе-

риментов Г. Герца (1887), а также П. Н. Лебедева, А. С. Попова, К. Хюльсмайера и т. д. Одну из первых систем радиолокации "Чейн Хоум" продемонстрировал в феврале 1935 г. шотландский физик Роберт Уотсон-Уотт [2, 3]. В состав этой системы входят 3 передающих и 4 приемных антенны на разнесенных позициях. Такая система, где разнесены две позиции (приемная и передающая), называется бистатической радиолокационной системой. Первыми действующими пассивными радаром являются немецкие приемники "Klein Heidelberg", работавшие в 1943 г. для обнаружения самолетов на основе излучений

британских радаров "Чейн Хоум" [4]. После Второй мировой войны было разработано несколько совместных бистатических радиолокационных станций, однако внимание радиолокационного сообщества было в основном сосредоточено на технологии активной радиолокации.

Внимание к полуактивной радиолокации возникло в европейских странах в 1980-х гг., благодаря исследованию Н. D. Griffiths и N. R. W. Long [5]. Такой интерес в основном был вызван необходимостью реагировать на все более перегруженную электромагнитную обстановку, обусловленную распространением услуг связи [6]. Полуактивная радиолокация становится все более популярной из-за ее достоинств: отсутствия необходимости выделения частоты; меньшей стоимости производства и эксплуатации; скрытной работы; отсутствия вредного воздействия на окружающую среду и помех другим радиотехническим устройствам. Ее популярность возросла также за счет увеличения вычислительной мощности компьютеров, что позволило реализовывать и выполнять относительно сложную обработку сигналов в режиме реального времени. Основным недостатком является отсутствие контроля за передатчиком полуактивной радиолокационной системы (ПАРЛС).

На сегодняшний день были разработаны несколько промышленных ПАРЛС: система "Silent Sentry" компании Lockheed-Martin; системы "Cellidar" компании Roke Manor; системы "Homeland Alerter 100" компании Thales; система "SINBAD" компании Thales; ПАРЛС "Поле" предприятия "Алевкурп"; система "Aulos" фирмы Selex ES; системы "Manastash Ridge Radar" университета Вашингтона (США). Эти полуактивные системы хорошо описаны в [1, 7, 8]. Сигналами подсвета в перечисленных ПАРЛС являются аналоговые и цифровые сигналы, радио- или наземного телевизионного вещания (FM, DAB, DVB-T) и сигнал сотовой связи GSM. Исследования, проведенные с использованием перечисленных сигналов в качестве подсвета, показали возможности обнаружения и оценки параметров движения целей различных классов [9–12].

Сегодня технология полуактивной радиолокации уже достигла высокого уровня технологической зрелости. Большая часть научной деятельности направлена в сторону исследования

возможностей использования новых сигналов подсвета. Проводятся исследования ПАРЛС с применением в качестве источников сигналов подсвета передатчиков глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Сигналы ГНСС используются для обеспечения широкой зоны покрытия за счет наличия нескольких спутниковых созвездий на средней околоземной орбите (например, GPS, Galileo, ГЛОНАСС), которые обеспечивают прямую видимость нескольких спутников в любой точке земного шара. Возможности работы ПАРЛС на основе ГНСС были показаны для различных целей (корабли, самолеты и транспортные средства) [13–15]. Тем не менее низкая мощность сигнала на уровне земли ограничивает ожидаемую зону действия такой ПАРЛС. Также были проведены исследования по использованию в качестве подсвета сигналов системы спутникового интернета Starlink [16]. Однако развертывание такой системы во многих странах может вызвать противоречие с принятыми нормами безопасности.

Использование новых сигналов подсвета в ПАРЛС связано, с одной стороны, с развитием беспроводных систем связи в части улучшения свойств сигналов, повышения надежности и пропускной способности. Так, сигнал подсвета с более широкой полосой частот позволяет ПАРЛС осуществлять более точное обнаружение целей.

С другой стороны, поиск других типов сторонних передатчиков для ПАРЛС связан с постепенным выводом из эксплуатации ранее используемых систем связи. Так, в обозримом будущем мобильная связь стандартов GSM и UMTS будет полностью замещена связью стандартов четвертого поколения LTE. Сети этого стандарта покрывают большую территорию, что вызывает большой интерес для использования сигналов LTE в качестве источников подсвета для ПАРЛС [17, 18].

На перспективную смену LTE уже сейчас во многих странах развертываются сети мобильной связи пятого поколения (5G). Сигнал 5G имеет большую полосу пропускания (обычно от 50 до 400 МГц), поэтому его использование может позволить разрабатывать системы ПАРЛС высокого разрешения с хорошим покрытием на малых высотах в городских районах. В настоящей статье приводятся результаты анализа возможностей использования сигналов 5G в качестве подсвета в ПАРЛС.

Параметры полуактивной радиолокации.

1. *Бистатическая дальность.* Базовая геометрия полуактивной радиолокационной системы, состоящей из источника подсвета (передатчик) и приемной позиции (приемник), приведена на рис. 1. Здесь L – расстояние между приемником и передатчиком; R_t – расстояние от передатчика до цели; R_r – расстояние от приемника до цели; β – бистатический угол; α_t – направление на цель относительно передатчика; α_r – направление на цель относительно приемника; \mathbf{v} – вектор скорости цели; θ – угол между вектором скорости цели и биссектрисой бистатического угла; N обозначает направление на север.

В полуактивной радиолокации передатчик и приемник имеют два разных местоположения. Сигнал от передатчика распространяется до приемной позиции двумя способами: прямым путем на расстояние L ; непрямым (в результате отражения от цели) путем на расстояние $R_t + R_r$. Разность расстояний непрямого и прямого пути определяет бистатическую дальность:

$$R_b = R_t + R_r - L.$$

Время задержки отраженного сигнала относительно прямого определяется отношением бистатической дальности к скорости света:

$$\tau = \frac{R_b}{c}.$$

2. *Дальность действия ПАРЛС* определяется согласно выражению

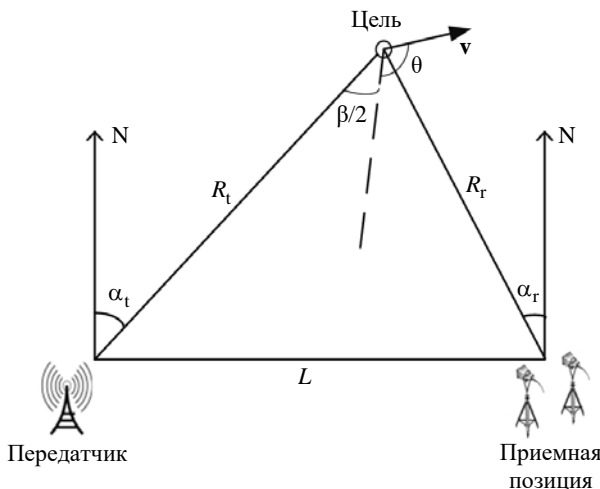


Рис. 1. Геометрия полуактивной радиолокационной системы
 Fig. 1. Passive radar geometry

$$(R_t R_r)^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 k T_0 k_n q \Delta f L_t L_r},$$

где $R_t R_r$ – произведение расстояний от передатчика до цели и от цели до приемника; P_t – мощность передатчика; G_t – коэффициент усиления передающей антенны; G_r – коэффициент усиления приемной антенны; λ – длина волны; σ – бистатическая эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) цели; F_t – коэффициент потерь при распространении сигнала от передатчика до цели; F_r – коэффициент потерь при распространении сигнала от цели до приемника; k – постоянная Больцмана; T_0 – температура окружающей среды; k_n – коэффициент шума приемника; q – отношение сигнал/шум; Δf – полоса пропускания приемника; L_t, L_r – потери в передающем и приемном устройствах.

3. *Разрешающая способность по дальности.* В полуактивной радиолокации бистатическая геометрия приводит к набору концентрических эллипсов одинаковой бистатической дальности, фокусами которой являются передатчик и приемник. Это отличие от активной моностатической РЛС необходимо дополнительно учитывать при оценке разрешающей способности полуактивной радиолокации по дальности:

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f_0 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)},$$

где Δf_0 – ширина спектра зондирующего сигнала.

4. *Доплеровское смещение частоты.* Бистатический доплеровский сдвиг можно определить по формуле

$$f_d = \frac{v_b}{\lambda}.$$

Бистатическая скорость равна производной от бистатической дальности:

$$v_b = \frac{dR_b}{dt} = \frac{dR_t}{dt} + \frac{dR_r}{dt}.$$

Бистатическое доплеровское смещение частоты может быть выражено целевыми бистатическими компонентами скорости и угла:

$$f_{\text{д}} = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \cos \left(\frac{\beta}{2} \right),$$

где v – модуль скорости цели.

5. Разрешающая способность по доплеровской частоте. Доплеровское разрешение определяется временем когерентного накопления ($T_{\text{с}}$): $\Delta f_{\text{д}} = 1/T_{\text{с}}$. Тогда разрешающая способность по скорости определяется выражением $\Delta v = \Delta f_{\text{д}} \lambda$, а по радиальной скорости:

$$\Delta v_{\text{r}} = \frac{\lambda}{2T_{\text{с}} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right)}.$$

Сигнал 5G. ПАРЛС, работающая по сигналам 5G, может быть основана на использовании сигналов связи между базовой станцией 5G New Radio (NR) и пользовательским оборудованием (UE). Основные правила стандарта 5G NR, разработанного консорциумом 3GPP, описаны в технической спецификации, серия 38 [19].

Полоса частот для 5G NR разделена на два частотных диапазона: диапазон 410 МГц...7.125 ГГц, обычно называемый частотным диапазоном 1 (FR1), и миллиметровый диапазон частот 24.25...52.6 ГГц (FR2). Полоса пропускания

сигнала 5G достигает 100 МГц в диапазоне FR1 и 400 МГц в диапазоне FR2.

Сеть 5G может работать или в режиме дуплекса с частотным разделением каналов (frequency division duplex – FDD), или в режиме дуплекса с временным разделением (time division duplex – TDD). В России в настоящее время тестируются сети 5G в частотном диапазоне 4.8...5.0 ГГц (частотный канал n79) в режиме TDD. В режиме TDD существует три типа слотов: для нисходящих каналов (сигналы от базовой станции к абонентскому терминалу); для восходящих каналов (от абонентского терминала к базовой станции) и специальные слоты (гибкая конфигурация).

Сигнал 5G NR представляет собой сигнал OFDM с циклическим префиксом и состоит из кадров. Длина одного кадра постоянна и равна $T_{\text{к}} = 10$ мс. Каждый кадр состоит из десяти подкадров ($T_{\text{пк}} = 1$ мс), разделенных на слоты (рис. 2). Количество слотов в подкадре переменное и зависит от нумерологии, которая описывается параметром $\mu \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$. Количество слотов в подкадре, количество символов OFDM для обычного циклического префикса в слоте и соответствующая ширина поднесущей приведены в таблице.

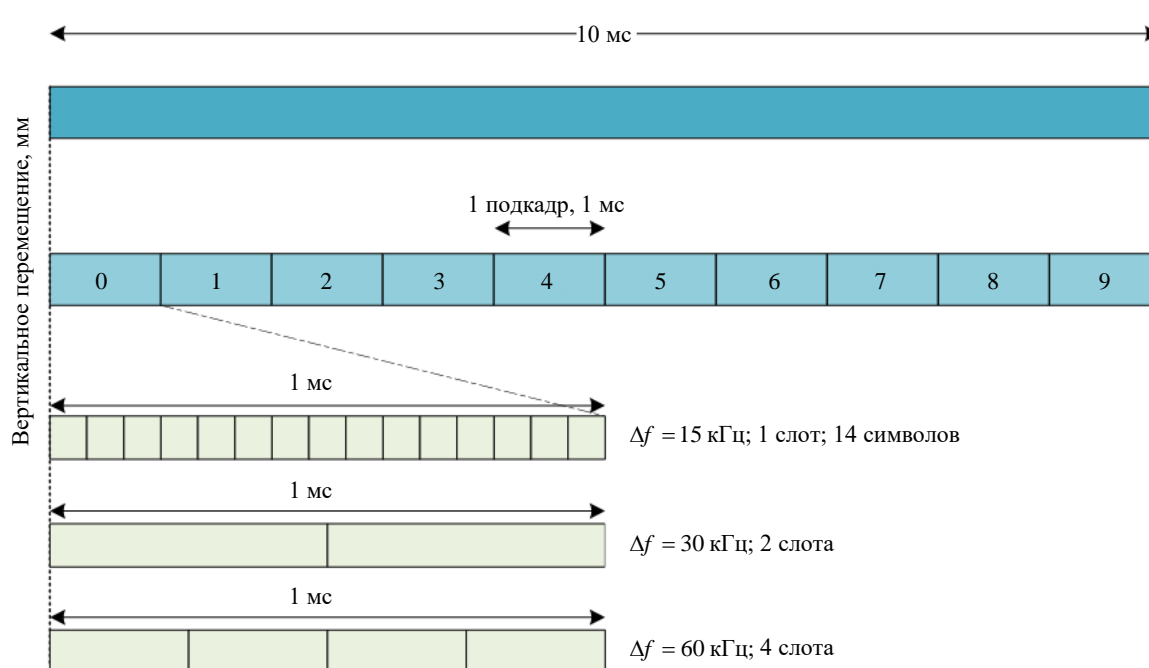


Рис. 2. Структура кадра 5G NR

Fig. 2. 5G NR frame structure

Зависимость ширины поднесущей от нумерологии

Dependence of subcarrier width on numerology

μ	Количество слотов	Количество символов	Ширина поднесущей, кГц $\Delta f_c = 2^\mu \cdot 15$
0	1	14	15
1	2	14	30
2	4	14	60
3	8	14	120
4	16	14	240

Сигнал 5G разделен не только по времени, но и по частоте. Наименьшим временным интервалом сигнала 5G является один символ, а наименьшим квантом частоты – ширина поднесущей. Элемент частотно-временного ресурса представляет собой наименьший частотно-временной ресурс, состоящий из 1 символа и 1 поднесущей. Блок ресурсов определяется только в частотной области и состоит из 12 поднесущих. Все доступные блоки ресурсов составляют сетку ресурсов (рис. 3).

Пример ресурсной сетки нисходящей линии 5G приведен на рис. 4. Схемы построены с помощью приложения 5G Waveform Generator от MATLAB. На рис. 4, а зеленое поле – это физический канал PDSCH, отвечающий за передачу

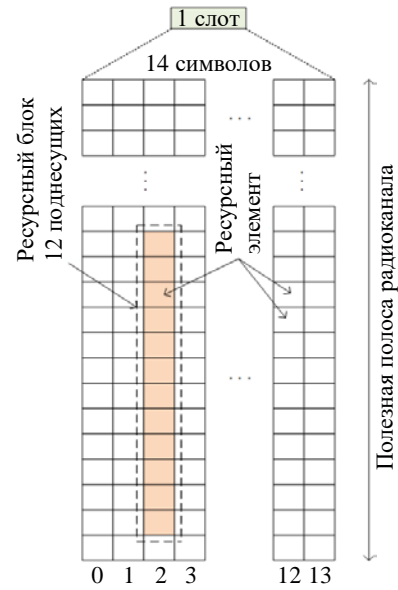
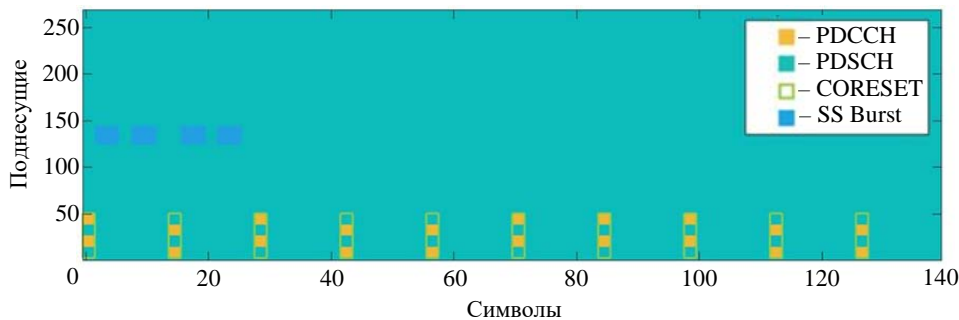


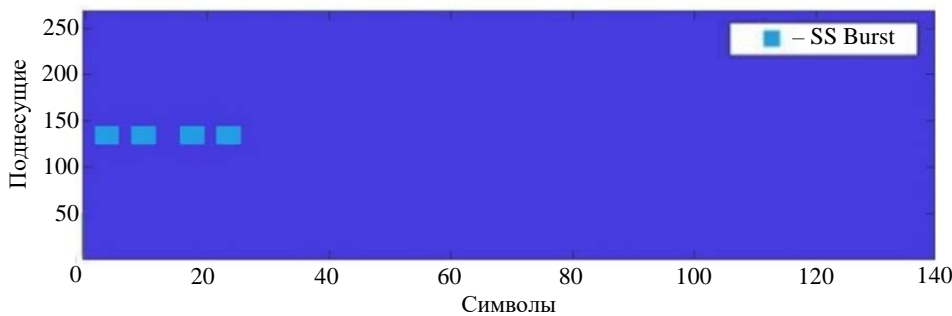
Рис. 3. Ресурсная сетка 5G NR

Fig. 3. 5G NR resource grid

пользовательских данных по нисходящей линии связи. Вся сетка ресурсов покрыта зеленым цветом. Это означает, что все возможные блоки ресурсов выделены для данных. Синие прямоугольники – это ресурсы, отвечающие за синхронизацию – SSB, сгруппированы в пакеты сигналов синхронизации. Желтые прямоугольники – ресурсы, отвечающие за управле-



а



б

Рис. 4. Ресурсная сетка нисходящей линии: а – с полезными данными; б – только с сигналом синхронизации

Fig. 4. Downlink resource grid: а – with useful data; б – only SSB signal

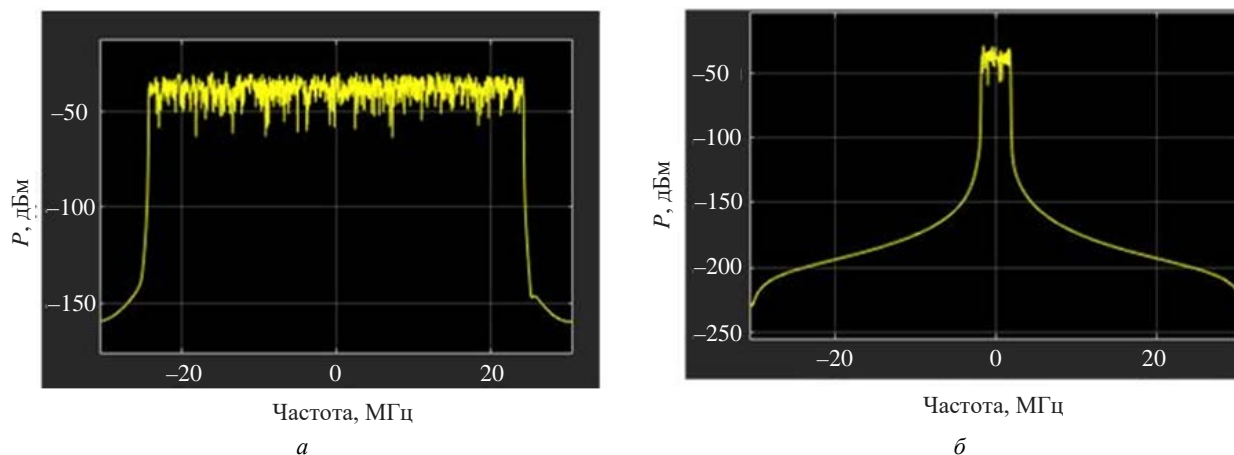


Рис. 5. Спектр нисходящей линии: а – с полезными данными; б – только с сигналом синхронизации
Fig. 5. Downlink Spectrum: а – with useful data; б – only SSB signal

ние нисходящей линии связи (PDCCH).

Случай, когда полезные данные отсутствуют, показан на рис. 4, б. Единственные выделенные ресурсные сетки предназначены для SSB, которые являются "всегда активными" сигнальными блоками, отвечающими за синхронизацию с базовой станцией. Остальные частотно-временные ресурсы не используются.

В приведенных на рис. 4 примерах показан характер передачи в зависимости от контента в 5G NR. При отсутствии активных пользователей (загрузки данных нет) передачи сигнала тоже почти нет. По мере того как пользователи генерируют больше трафика данных, сигнал становится более заполненным как во временной, так и в частотной областях. Соответствие спектра размещению данных нисходящей линии в обоих случаях показано на рис. 5. Эта зависимость имеет решающее значение с точки зрения эффективности работы полуактивной радиолокационной системы.

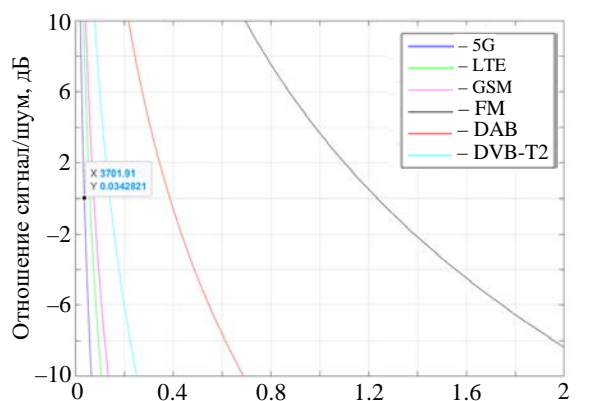
Результаты. В исследованиях при оценке характеристик ПАРЛС рассматривался сигнал подсвета 5G нисходящей линии, который имеет центральную частоту 4.8 ГГц и ширину спектра $\Delta f_0 = 50$ МГц. При расчетах были приняты следующие параметры: передаваемая мощность $P_t = 20$ дБВт; коэффициент усиления передающей антенны $G_t = 30$ дБ; коэффициент усиления приемной антенны $G_r = 30$ дБ; температура окружающей среды $T_0 = 300$ К; полоса пропускания приемника $\Delta f = 50$ МГц; ЭПР цели $\sigma = 5$ м²; $F_t = F_r = -3$ дБ и $L_t = L_r = 1$ дБ; $k_n = 1$.

При анализе дальности действия ПАРЛС проведен расчет эквивалентной моностатической дальности $R_m = \sqrt{R_r R_t}$.

Результаты сравнительного анализа дальности действия, разрешающей способности по дальности и радиальной скорости для ПАРЛС с разными источниками подсвета приведены на рис. 6–8.

На рис. 6 можно заметить, что крайняя правая линия, соответствующая FM-сигналу, показывает, что ПАРЛС с использованием FM-сигнала имеет дальность обнаружения цели большую, чем ПАРЛС с использованием других рассмотренных сигналов.

Для бистатического угла $\beta = 30^\circ$ разрешение по дальности в зависимости от ширины полосы показано на рис. 7. На нем представлены результаты сравнения разрешения по дальности для сигналов 5G и LTE, работающего в



Эквивалентная моностатическая дальность ($\times 10^5$, м)
Рис. 6. Зависимости отношения сигнал/шум от эквивалентной моностатической дальности ПАРЛС

Fig. 6. Dependences of SNR on the equivalent monostatic range of the passive radar

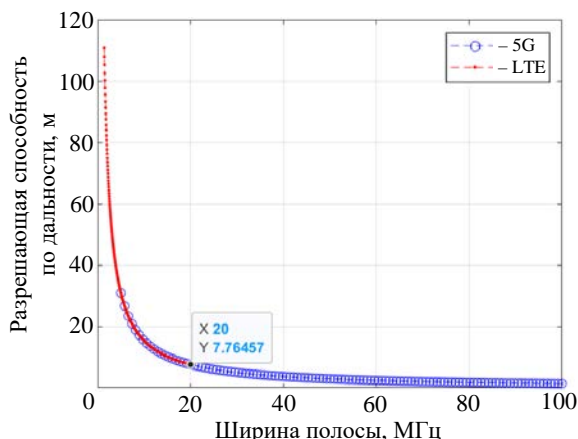


Рис. 7. Разрешающая способность по дальности LTE и 5G
 Fig. 7. Range resolution of LTE and 5G

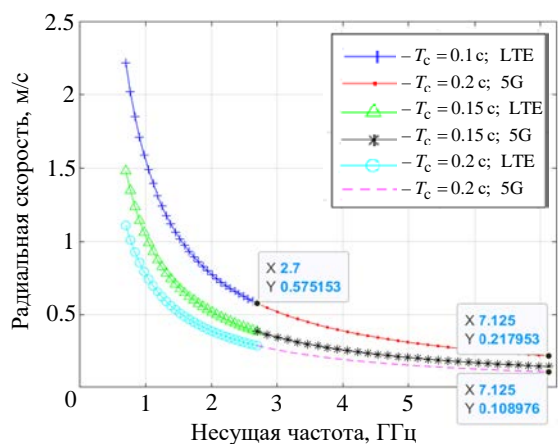


Рис. 8. Разрешающая способность по радиальной скорости LTE и 5G при разных значениях времени когерентного накопления

Fig. 8. Radial velocity resolution of LTE and 5G for different coherent accumulation time

частотных диапазонах от 0.7 до 2.7 ГГц. Полоса рабочих частот для LTE изменяется от 1.4 до 20 МГц, а для 5G NR – от 5 до 100 МГц. Видно, что максимально достижимое разрешение по дальности для LTE составляет 7.76 м при полосе пропускания 20 МГц. Теоретически при полосе пропускания 100 МГц разрешение для сигнала 5G NR может достигать 1.55 м. Из этих результатов можно сделать вывод, что сигнал формата 5G NR обеспечивает лучшее разрешение по дальности, чем LTE.

Разрешение по скорости определяется выбранным временем когерентного накопления и частотой несущей. В расчетах полагаем, что LTE работает в диапазоне частот от 0.7 до 2.7 ГГц. Для сравнения возьмем сигнал 5G NR в диапазоне частот от 410 МГц до 7.125 ГГц (FR1). Время когерентного накопления рассматривается в диапазоне от 0.1 до 0.2 с. Разрешение по

радиальной скорости для LTE и 5G NR для различных значений времени когерентного накопления 0.1, 0.15 и 0.2 с отображено на рис. 8. Чем больше время когерентного накопления, тем выше разрешающая способность по доплеровской частоте и, соответственно, радиальной скорости.

Анализируя разрешение по скорости, рассмотрим участок диапазона частот FR1 сигнала 5G NR в интервале от 2.7 до 7.125 ГГц. Для сигнала LTE при $T_c = 0.1$ с и максимальной рабочей частоте 2.7 ГГц разрешение по скорости достигает 0.575 м/с, в то время как для 5G NR на рабочей частоте 7.125 ГГц разрешение по скорости составляет 0.217 м/с.

При $T_c = 0.2$ с ПАРЛС с сигналом подсвета 5G NR имеет разрешающую способность по радиальной скорости 0.108 м/с. Следовательно, сигнал 5G можно эффективно использовать для обнаружения медленно движущихся целей на фоне отражений от земной поверхности.

В результате изучения характеристик и структуры сети 5G, а также анализа полученных оценок потенциальных параметров ПАРЛС с использованием сигнала подсвета 5G можно отметить, что сеть 5G имеет ряд значительных отличий от широко используемых источников сигналов в ПАРЛС.

Сигналы 5G NR имеют 2 диапазона рабочих частот: $FR1 \leq 7.125$ ГГц и $FR2$ 24.25...52.6 ГГц. При этом максимальная полоса пропускания составляет 100 МГц для FR1 и 400 МГц для FR2. Такие параметры позволяют получать результаты с высоким разрешением по дальности. В будущем полосу пропускания сигналов 5G планируется увеличить до 600 МГц, что позволит получать в ПАРЛС радиолокационные изображения со сверхразрешением.

При работе в диапазоне FR2, т. е. на частотах выше 24 ГГц, дальность действия 5G ограничена сотнями метров, так как базовые станции на этих частотах излучают низкую мощность и используются по большей части для охвата небольших территорий в городских районах и внутри зданий. Для покрытия большой дальности на открытом воздухе используются макробазовые станции, работающие на частотах FR1. Расстояние между макробазовыми станциями может составлять от десятков метров до 1.5...2 км. Такая архитектура расположения передатчиков позволяет

построить многоузловую ПАРЛС. Кроме того, в одной зоне покрытия мобильной связи, как правило, работает несколько операторов и, соответственно, будет присутствовать несколько источников подсвета, что дает дополнительные возможности для создания многопозиционных ПАРЛС.

Существуют также определенные ограничения и сложности в использовании сигналов 5G в качестве подсвета в ПАРЛС. Они связаны как с особенностями работы 5G, так и с отсутствием контроля за сторонним передатчиком.

Так, в тестовых сетях 5G NR используется метод TDD. Такой метод передачи предполагает наличие периодических промежутков в сигнале, что может ограничивать возможность работы ПАРЛС с сигналом подсвета от 5G.

Свою специфику с точки зрения применения в полуактивной радиолокации имеют свойства технологии многопользовательского доступа Massive MIMO с формированием луча диаграммы направленности, которая используется в 5G. Направленный луч исключает возможность освещения всего сектора, и сигнал охватывает только определенный угловой диапазон. В случае когда приемник ПАРЛС не попадает в освещенный сектор, получение опорного сигнала является затруднительным.

Основной недостаток ПАРЛС – отсутствие возможности управления сторонним передатчиком. Для сигнала 5G, при отсутствии активных пользователей, передаваемого сигнала почти нет, значит, нет и сигнала подсвета для

ПАРЛС. Но ресурсные сетки, предназначенные для SSB, являются "всегда активными" сигнальными блоками, отвечающими за синхронизацию с базовой станцией. Кроме того, передача разных SSB реализуется в виде временной развертки по всей зоне покрытия. Следовательно, в этом случае можно реализовать ПАРЛС с использованием сигналов 5G SSB, что делает радиолокационную систему на основе 5G надежной и способной работать непрерывно, а не только во время передачи слотов с плотным потоком данных нисходящей линии связи. Хотя при этом, в сравнении с 5G с полными данными, мощность сигнала, ширина спектра, а соответственно, и разрешение по дальности уменьшаются.

Заключение. В настоящей статье приведены результаты исследований в области полуактивной радиолокации по сигналам пятого поколения мобильной связи: рассмотрена структура сигнала 5G; проанализированы возможности создания ПАРЛС при использовании в качестве подсвета сигнала 5G. Сигнал 5G обеспечивает лучшее разрешение по дальности и скорости, чем сигналы других телекоммуникационных систем, а источник сигнала 5G можно использовать в качестве стабильного передатчика для ПАРЛС на относительно небольших территориях. Эти преимущества открывают дополнительные пути развития ПАРЛС с целью обеспечения безопасности движения транспорта, контроля движения на железнодорожных переездах, в охранных системах.

Авторский вклад

Кутузов Владимир Михайлович – теоретическое описание; постановка задачи.

Веремьев Владимир Иванович – участие в обсуждении результатов; оформление текста статьи.

Нгуен Ван Туан – теоретическое описание; моделирование; обработка и анализ результатов.

Воробьев Евгений Николаевич – участие в обсуждении результатов; оформление текста статьи.

Author's contribution

Vladimir M. Kutuzov, theoretical description; statement of the problem.

Vladimir I. Veremyev, participation in the discussion of the results; preparation of the manuscript.

Nguyen Van Tuan, theoretical description; simulation; processing and analysis of the results.

Evgenii N. Vorobev, participation in the discussion of the results; preparation of the manuscript.

Список литературы

1. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов, Д. А. Ковалев, В. М. Кутузов, В. Н. Михайлов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 163 с.

2. Kuschel H. Approaching 80 Years of Passive Radar // 2013 Intern. Conf. on Radar. Adelaide, Aus-

tralia, 09–12 Sept. 2013. IEEE, 2013. P. 213–217. doi: 10.1109/RADAR.2013.6651987

3. Griffiths H. Early History of Bistatic Radar // 2016 European Radar Conf. (EuRAD). London, UK, 05–07 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 253–257.

4. Griffiths H., Willis N. Klein Heidelberg – The

First Modern Bistatic Radar System // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 2010. Vol. 46, iss. 4. P. 1571–1588. doi: 10.1109/TAES.2010.5595580

5. Griffiths H. D., Long N. R. W. Television Based Bistatic Radar // IEE Proc. F – Communications, Radar and Signal Processing. 1986. Vol. 133. P. 649–657. doi: 10.1049/ip-f-1.1986.0104

6. Radar Spectrum Engineering and Management: Technical and Regulatory Issues / H. Griffiths, L. Cohen, S. Watts, E. Mokole, C. Baker, M. Wicks, S. Blunt // Proc. of the IEEE. 2015. Vol. 103, № 1. P. 85–102. doi: 10.1109/JPROC.2014.2365517

7. Griffiths H. D., Baker C. J. An introduction to passive radar. London: Artech House, 2017. 215 p.

8. Malanowski M. Signal Processing for Passive Bistatic Radar. London: Artech House, 2019. 380 p.

9. Petó T., Dudás L., Seller R. DVB-T based passive radar // 24th Intern. Conf. Radioelektronika, Bratislava, Slovakia, 15–16 Apr. 2014. IEEE, 2014. P. 1–4. doi: 10.1109/Radioelek.2014.6828433

10. Experimental Research of Multi-FM Based Passive Radar / D. Xie, J. Yi, J. Shen, X. Wan // 12th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Hangzhou, China, 03–06 Dec. 2018. IEEE, 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634281

11. Полуактивная РЛС мониторинга обстановки и охраны объектов / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, А. А. Головков, В. М. Кутузов, В. Н. Малышев // Наука и образование: технология успеха: сб. докл. Междунар. науч. конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. С. 32–37.

12. Vorobev E., Veremyev V., Tulenkov N. Experimental DVB-T2 Passive Radar Signatures of Small UAVs // 2019 Signal Processing Symp. (SPS Sympo), Krakow, Poland, 17–19 Sept. 2019. IEEE, 2019. P. 67–70. doi: 10.1109/SPS.2019.8881955

13. Нгуен Ван Куан. Пассивная радиолокационная система мониторинга движения судов в прибрежных районах с использованием спутниковых сигналов подсвета // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 3. С. 41–52. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52

14. Нгуен Ван Куан. Мониторинг судоходства в прибрежных морских районах полуактивной радиолокационной системы с использованием сигналов подсвета спутникового базирования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-6-16

15. Improved 2D Ground Target Tracking in GPS-Based Passive Radar Scenarios / P. Gomez-del-Hoyo, N. del-Rey-Maestre, M.-P. Jarabo-Amores, D. Mata-Moya, M.-d.-C. Benito-Ortiz // Sensors. 2022. Vol. 22, iss. 5. P. 1724. doi: 10.3390/s22051724

16. Gomez-Del-Hoyo P., Gronowski K., Samczynski P. The STARLINK-based passive radar: preliminary study and first illuminator signal measurements // 23rd Intern. Radar Symp. (IRS), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022. P. 350–355. doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905046

17. Bartoletti S., Conti A., Win M. Z. Passive radar via LTE signals of opportunity // IEEE Intern. Conf. on Communications Workshops (ICC), Sydney, Australia, 10–14 June 2014. IEEE, 2014. P. 181–185. doi: 10.1109/ICCW.2014.6881193

18. LTE-based passive radars and applications: a review / Prabhat Kumar Rai, Abhinav Kumar, Mohammed Zafar Ali Khan, Linga Reddy Cenkeramaddi // Intern. J. of Remote Sensing. 2021. Vol. 42, iss. 19. P. 7489–7518. doi: 10.1080/01431161.2021.1959669

19. 3GPP Specification series: 38series. URL: <https://www.3gpp.org/dynareport?code=38-series> (дата обращения 10.10.2023).

Информация об авторе

Кутузов Владимир Михайлович – доктор технических наук (1997), профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), президент университета. Автор более 270 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Веремьев Владимир Иванович – кандидат технических наук (2000), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), директор НИИ "Прогноз". Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов – комплексный экологический мониторинг; комплексные вопросы построения радиолокационных систем; многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы для мониторинга воздушного пространства и морской поверхности.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Нгуен Ван Туан – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2021), аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; полуактивная радиолокация.

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиём, Ханой, Вьетнам

E-mail: hinhthien08@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5652-6111>

Воробьев Евгений Николаевич – кандидат технических наук (2022), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – полуактивная радиолокация; радиолокационное распознавание.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: envorobev@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>

References

1. Barkhatov A. V., Veremyev V. I., Vorobev E. N., Konovalov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokaciya* [Passive Coherent Radar]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, 163 p. (In Russ.)
2. Kuschel H. Approaching 80 Years of Passive Radar. 2013 Intern. Conf. on Radar. Adelaide, Australia, 09–12 Sept. 2013. IEEE, 2013, pp. 213–217. doi: 10.1109/RADAR.2013.6651987
3. Griffiths H. Early History of Bistatic Radar. 2016 European Radar Conf. (EuRAD). London, UK, 05–07 Oct. 2016. IEEE, 2016, pp. 253–257.
4. Griffiths H., Willis N. Klein Heidelberg – The First Modern Bistatic Radar System. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*. 2010, vol. 46, iss. 4, pp. 1571–1588. doi: 10.1109/TAES.2010.5595580
5. Griffiths H. D., Long N. R. W. Television Based Bistatic Radar. *IEE Proc. F – Communications, Radar and Signal Processing*. 1986, vol. 133, pp. 649–657. doi: 10.1049/ip-f-1.1986.0104
6. Griffiths H., Cohen L., Watts S., Mokole E., Baker C., Wicks M., Blunt S. Radar Spectrum Engineering and Management: Technical and Regulatory Issues. *Proc. of the IEEE*. 2015, vol. 103, no. 1, pp. 85–102. doi: 10.1109/JPROC.2014.2365517
7. Griffiths H. D., Baker C. J. An Introduction to Passive Radar. London, Artech House, 2017, 215 p.
8. Malanowski M. *Signal Processing for Passive Bistatic Radar*. London, Artech House, 2019, 380 p.
9. Petó T., Dudás L., Sella R. DVB-T Based Passive Radar. 24th Intern. Conf. Radioelektronika, Bratislava, Slovakia, 15–16 Apr. 2014. IEEE, 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/Radioelek.2014.6828433
10. Xie D., Yi J., Shen J., Wan X. Experimental Research of Multi-FM Based Passive Radar. 12th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Hangzhou, China, 03–06 Dec. 2018. IEEE, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634281
11. Barkhatov A.V., Veremyev V. I., Golovkov A. A., Kutuzov V. M., Malyshev V. N. Semi-Active Radar for Monitoring the Situation and Protection of Objects. *Science and Education: Technology of Success: Sat* Report Intern. Scientific Conf. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, pp. 32–37. (In Russ.)
12. Vorobev E., Veremyev V., Tulenkov N. Experimental DVB-T2 Passive Radar Signatures of Small UAVs. 2019 Signal Processing Symp. (SPSymo), Krakow, Poland, 17–19 Sept. 2019. IEEE, 2019, pp. 67–70. doi: 10.1109/SPS.2019.8881955
13. Nguyen Van Quan. A Passive Radar System for Monitoring of Coastal Areas Ship Traffic Using Satellite Illumination Signals. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 41–52. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52 (In Russ.)
14. Nguyen Van Quan. Coastal Shipping Radar Monitoring System with Satellites as Transmitters of Opportunity. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-6-16 (In Russ.)
15. Gomez-del-Hoyo P., del-Rey-Maestre N., Jarabo-Amores M.-P., Mata-Moya D., Benito-Ortiz M.-d.-C. Improved 2D Ground Target Tracking in GPS-Based Passive Radar Scenarios. *Sensors*. 2022, vol. 22, iss. 5, p. 1724. doi: 10.3390/s22051724
16. Gomez-Del-Hoyo P., Gronowski K., Samczynski P. The STARLINK-Based Passive Radar: Preliminary Study and First Illuminator Signal Measurements. 23rd Intern. Radar Symp. (IRS), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022, pp. 350–355. doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905046
17. Bartoletti S., Conti A., Win M. Z. Passive Radar via LTE Signals of Opportunity. *IEEE Intern. Conf. on Communications Workshops (ICC)*, Sydney, Australia, 10–14 June 2014. IEEE, 2014, pp. 181–185. doi: 10.1109/ICCW.2014.6881193
18. Prabhat Kumar Rai, Abhinav Kumar, Mohammed Zafar Ali Khan, Linga Reddy Cenkeramaddi. LTE-Based Passive Radars and Applications: A Review. *Intern. J. of Remote Sensing*. 2021, vol. 42, iss. 19, pp. 7489–7518. doi: 10.1080/01431161.2021.1959669
19. 3GPP Specification series: 38series. Available at: <https://www.3gpp.org/dynareport?code=38-series> (accessed 10.10.2023).

Information about the author

Vladimir M. Kutuzov, Dr Sci (Eng.) (1997), Professor, Head of the Department of Radio Engineering Systems, President of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 270 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Анализ возможностей использования сигналов подсвета 5G

в полуактивной радиолокационной системе

Feasibility Study of Using 5G Signals for Illumination Purposes in Passive Radar

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia
E-mail: vmkutuzov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

Vladimir I. Veremyev, Cand. Sci. (Eng.) (2000), Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Director of the Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: integrated environmental monitoring, complex issues of building radar systems, multi-band multi-position radar systems for airspace and sea surface monitoring.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia
E-mail: vervladiv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Nguyen Van Tuan, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2021), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). Area of expertise: radiolocation; semi-active radar.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam
E-mail: hinhthien08@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5652-6111>

Evgenii N. Vorobev, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Senior Researcher at the Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: passive radar, recognition of radar targets.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia
E-mail: envorobev@etu.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>
